

高輝度 LHC-ATLAS 実験の
ミュオントリガーにおける新検出器との
コインシデンスアルゴリズムの開発

京都大学 河本地弘

LHC-ATLAS 実験

LHC :

CERNの陽子陽子衝突型円形加速器

最大重心系エネルギー 14 TeV, 40 MHz での陽子同士の衝突

ATLAS :

LHCの衝突点に設置された汎用検出器を用いた実験

検出器としては

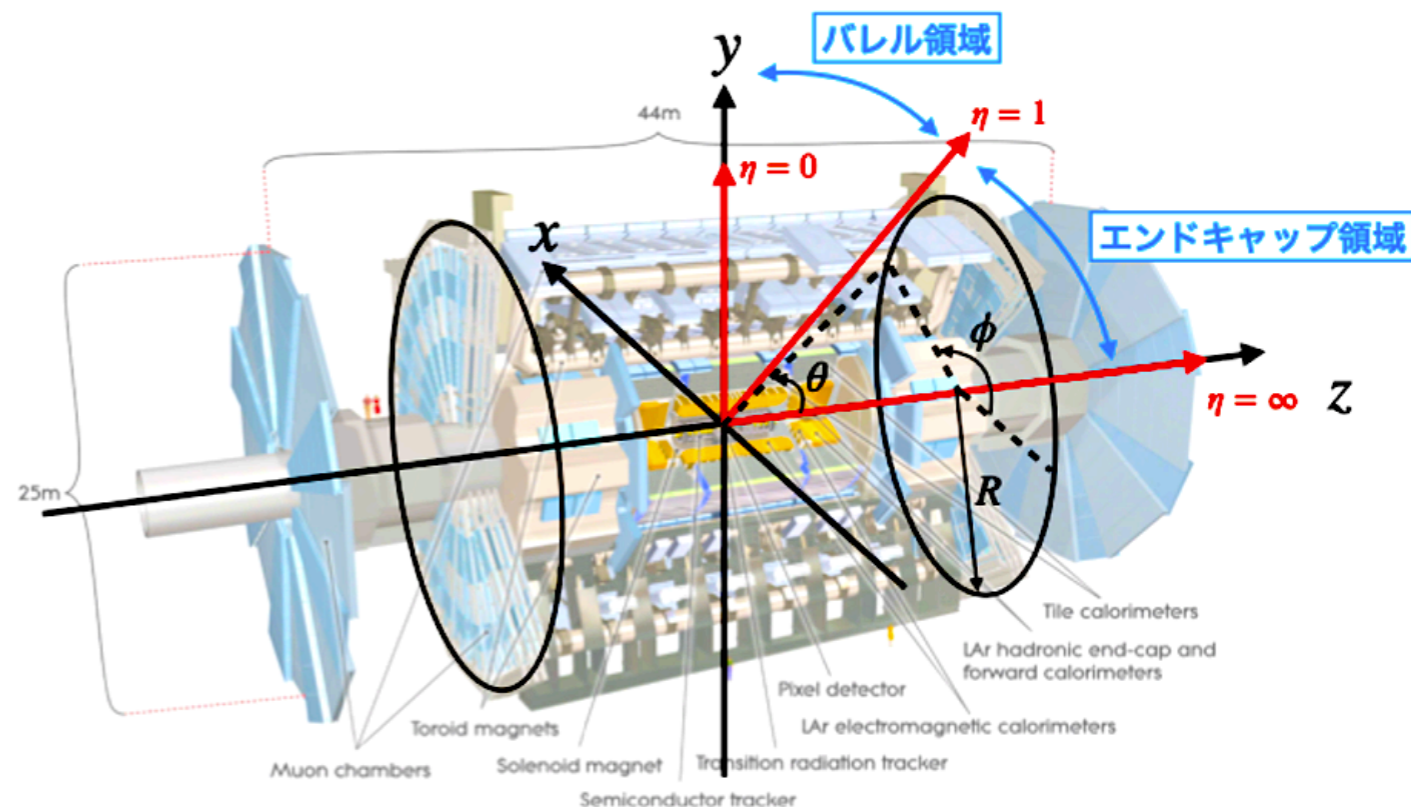
- ・ 内部飛跡検出器
- ・ 電磁・ハドロンカロリメータ
- ・ ミューオン検出器

に大別

円筒座標系に加え

擬ラピディティ $\eta = -\ln(\tan \theta/2)$

が用いられる。



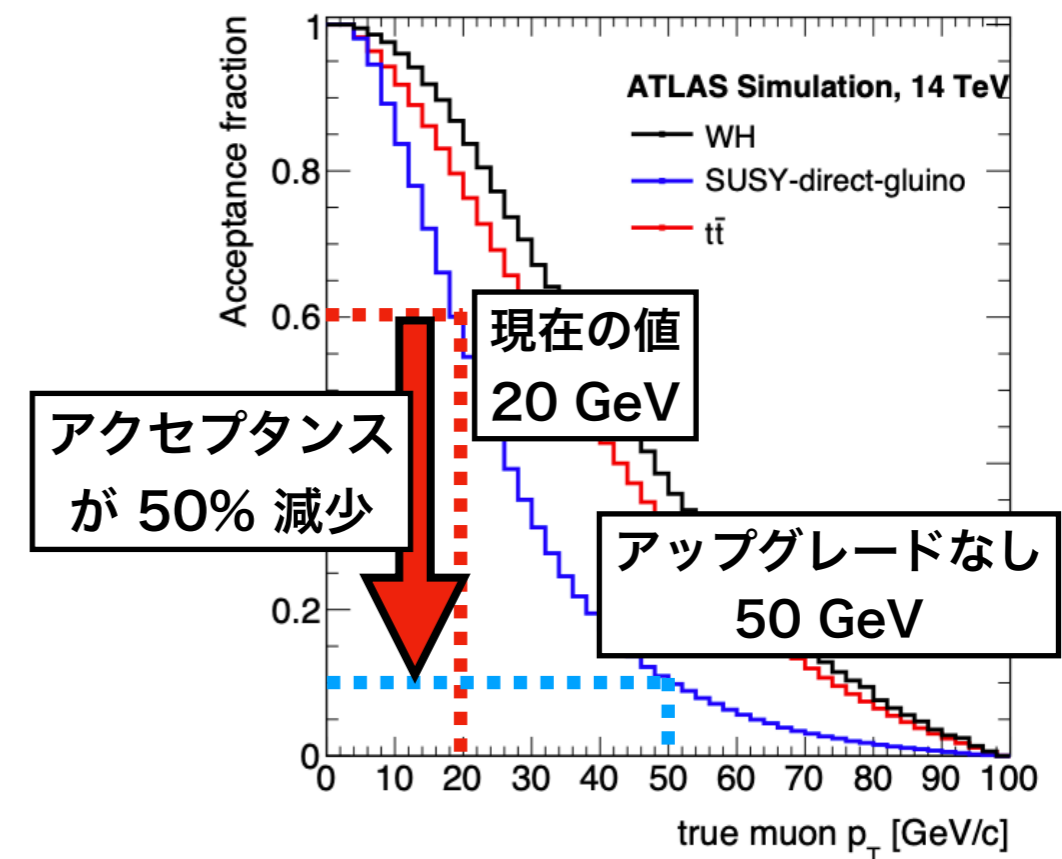
高輝度 LHC とトリガー

高輝度 LHC (HL-LHC) :

- ▶ 2028年より, 更なる高統計を目的として開始予定.
- ▶ 衝突数の増加に伴い, 背景事象によるトリガーレートが増加.
- ▶ そのままだと記録頻度の制限からトリガー閾値を上げるしかない
→測定したい物理へのアクセプタンスが下がってしまう.

		LHC	HL-LHC
ルミノシティ	ピーク値 [cm ⁻² s ⁻¹]	2 × 10 ³⁴	5 ~ 7.5 × 10 ³⁴
	積分値 [fb ⁻¹]	350	3000~4000

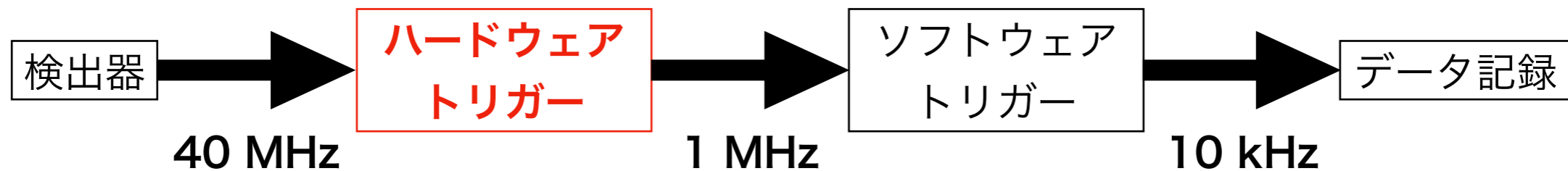
40 MHz での衝突における
単位時間あたりの衝突数が約 3 倍,
統計は約 10 倍 になる.



物理への感度を維持するにはトリガーシステムのアップグレードが重要.

HL-LHC での ATLAS トリガーシステム

- ▶ 初段のハードウェアトリガーと後段のソフトウェアトリガーの2段階の構成となっている。



- ▶ HL-LHC では判定時間が増え、現行のトリガーロジックよりも複雑なアルゴリズムを導入することが可能となる。

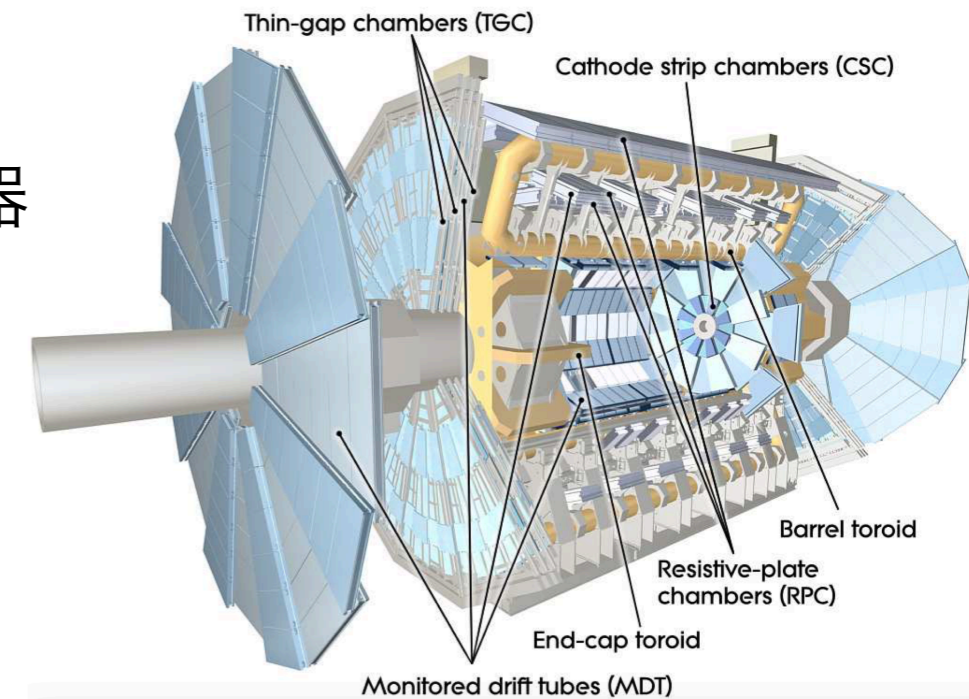
	LHC	HL -LHC
トリガーレート [kHz]	100	1000
判定時間 [μ s]	2.5	10

- ▶ 本研究では、ハードウェアトリガーである初段エンドキャップ部ミュオントリガーを扱う。

エンドキャップ部ミュオントリガー : TGC-BW

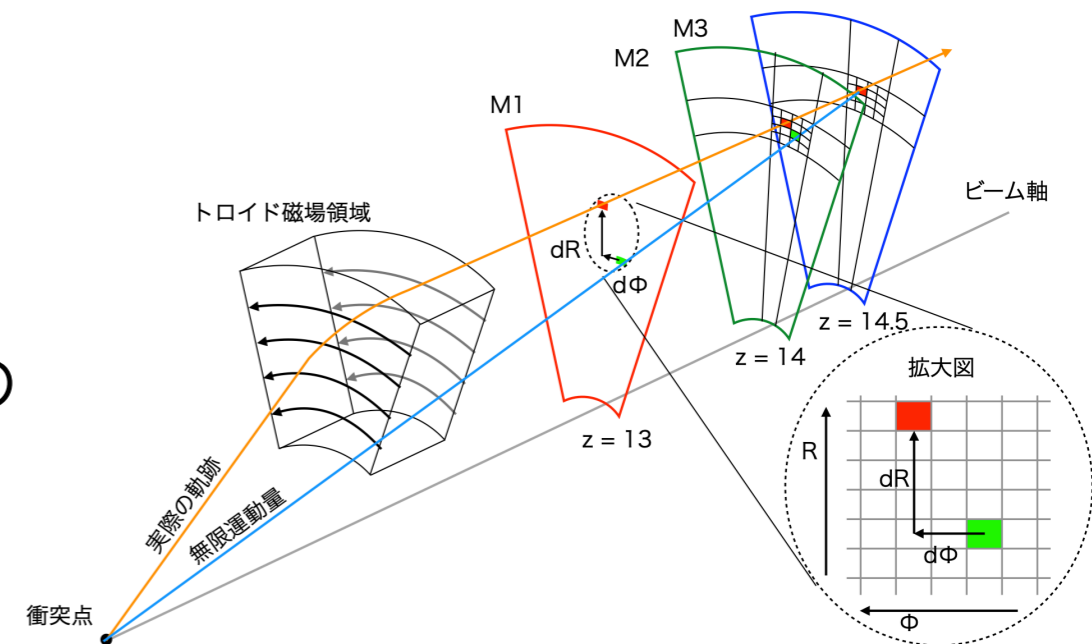
Thin Gap Chamber (TGC) :

エンドキャップ部に置かれたミュオン検出器
Big Wheel (BW) - 7 層, 3 ステーション
多線式比例計数管 (MWPC) の一種,
Wire と strip で $R(\eta)$, ϕ 情報を取得



横運動量 p_T 判定方法 :

磁場領域で曲がったミュオンについて,
3 ステーション間で無限運動量の軌道との
 dR , $d\phi$ をとって判定する.



ミュオントリガーの背景事象

TGC BW 単体でミュオントリガーを判定することの問題点：

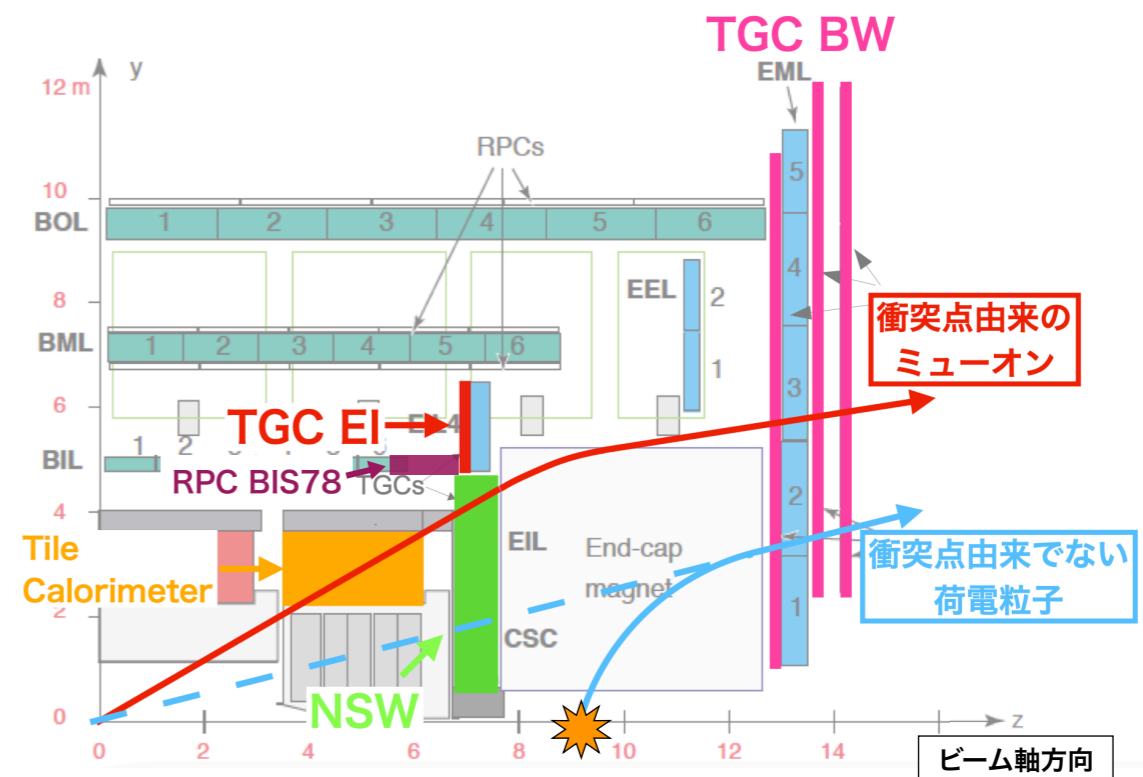
①低い p_T のミュオンによるトリガー：

低い p_T において TGC BW の分解能が低いことにより削減率が低下

②衝突点由来でない荷電粒子によるトリガー（フェイクトリガー）：

衝突で生じた粒子がビームパイプに衝突することで生じた荷電粒子が、衝突点由来の高い p_T のミュオンであるかのようなヒットを残す

→磁場内部の検出器とコインシデンスをとり，更にその高い分解能を生かしてトリガー性能を高める



磁場内部検出器とのコインシデンス

コインシデンスをとる検出器

$1.05 < |\eta| < 1.3$:

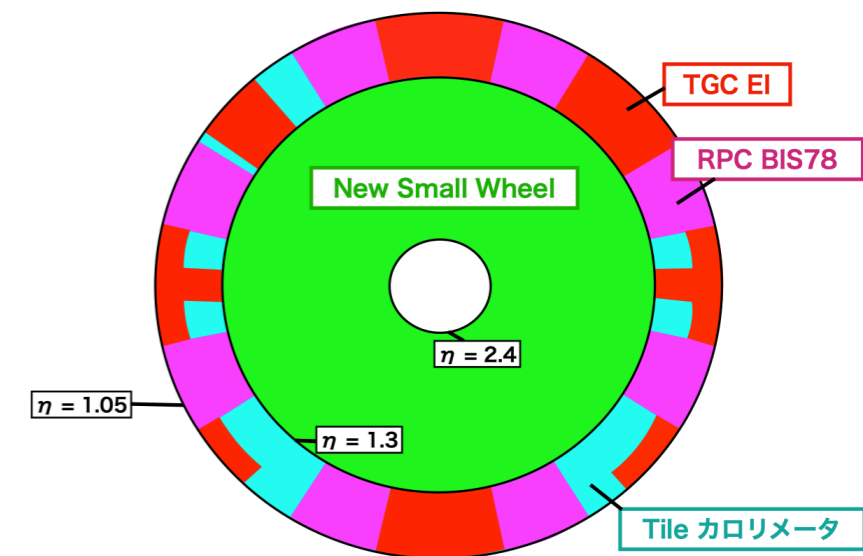
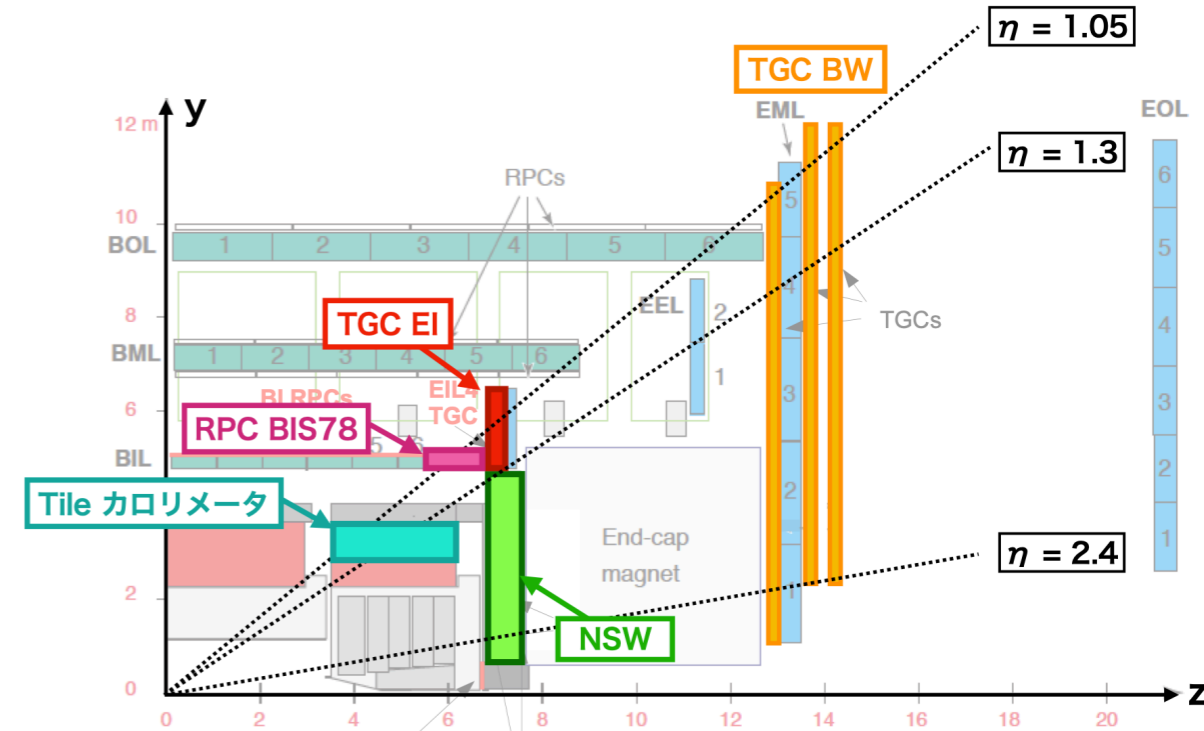
- ① **RPC BIS78** (η - ϕ 及び角度情報)
- ② **TGC EI** : (η 情報)
- ③ **Tile Calorimeter**

$1.3 < |\eta| < 2.4$:

- **NSW** (η - ϕ 及び角度情報)

▶ Tile Calorimeter には位置分解能がなく, 上記の優先順位をつけてコインシデンスをとる

▶ Resistive Plate Chamber (RPC) 検出器 :
高抵抗電極板間にガスを封入し, 外側の直行した strip で $R(\eta)$, ϕ 情報を取得



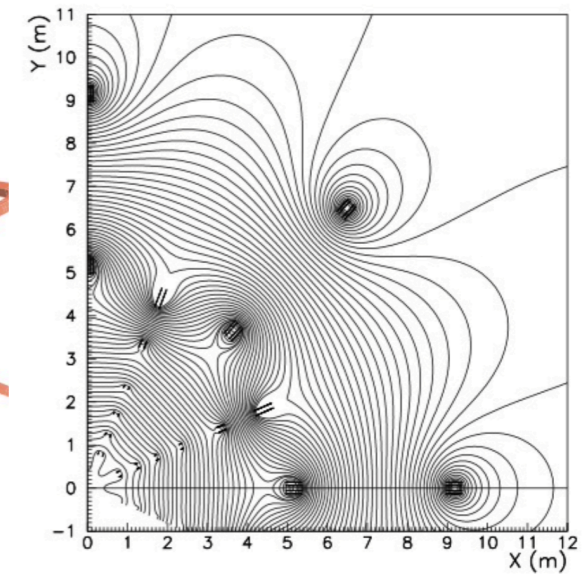
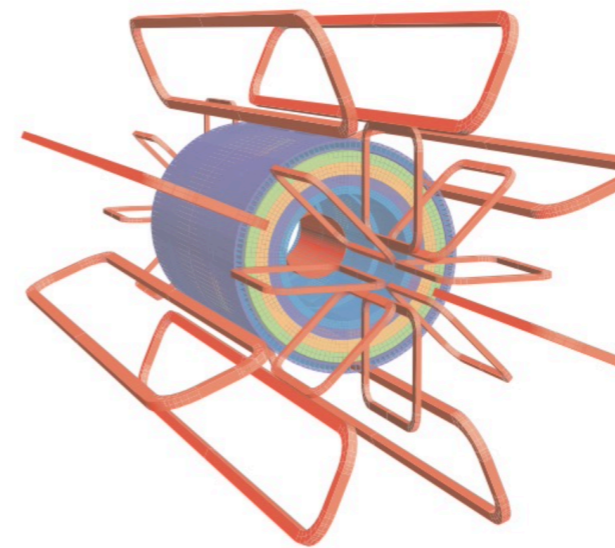
磁場によるズレとコインシデンス

トロイド磁場：

理想的には ϕ 位置によらない、

均一な ϕ 方向磁場

→磁場内部の検出器との η 位置の差から p_T を判定

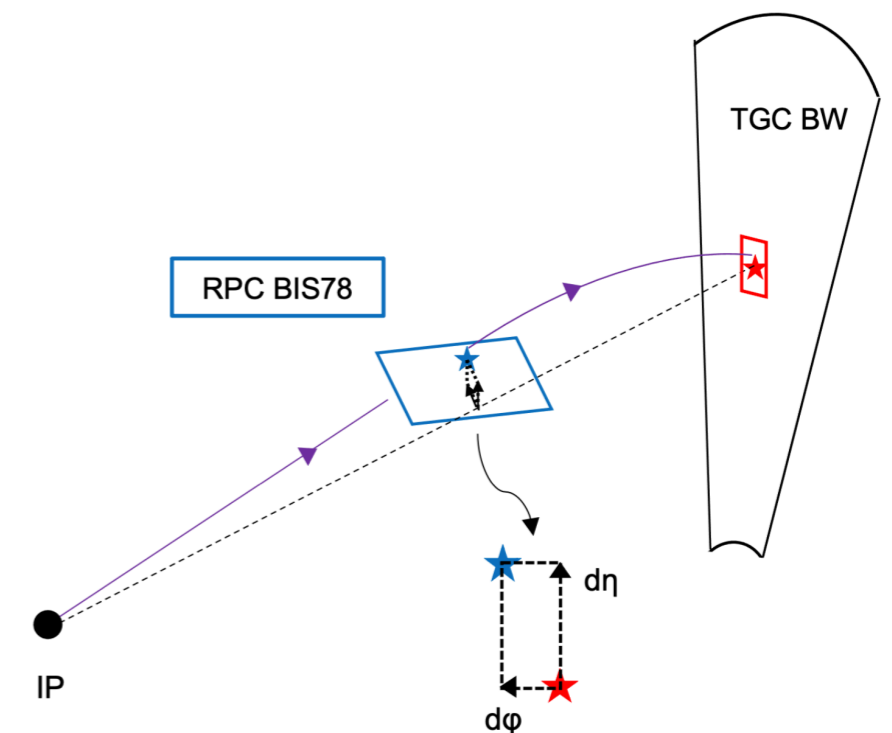


ATLAS のトロイド磁場
(X-Y 平面)

ATLAS の実際の磁場：

磁場は均一でなく、特に RPC BIS78 の存在領域ではトロイド磁石本体があるために磁場の歪みが大きく、ミューオンが ϕ 方向にも曲がる

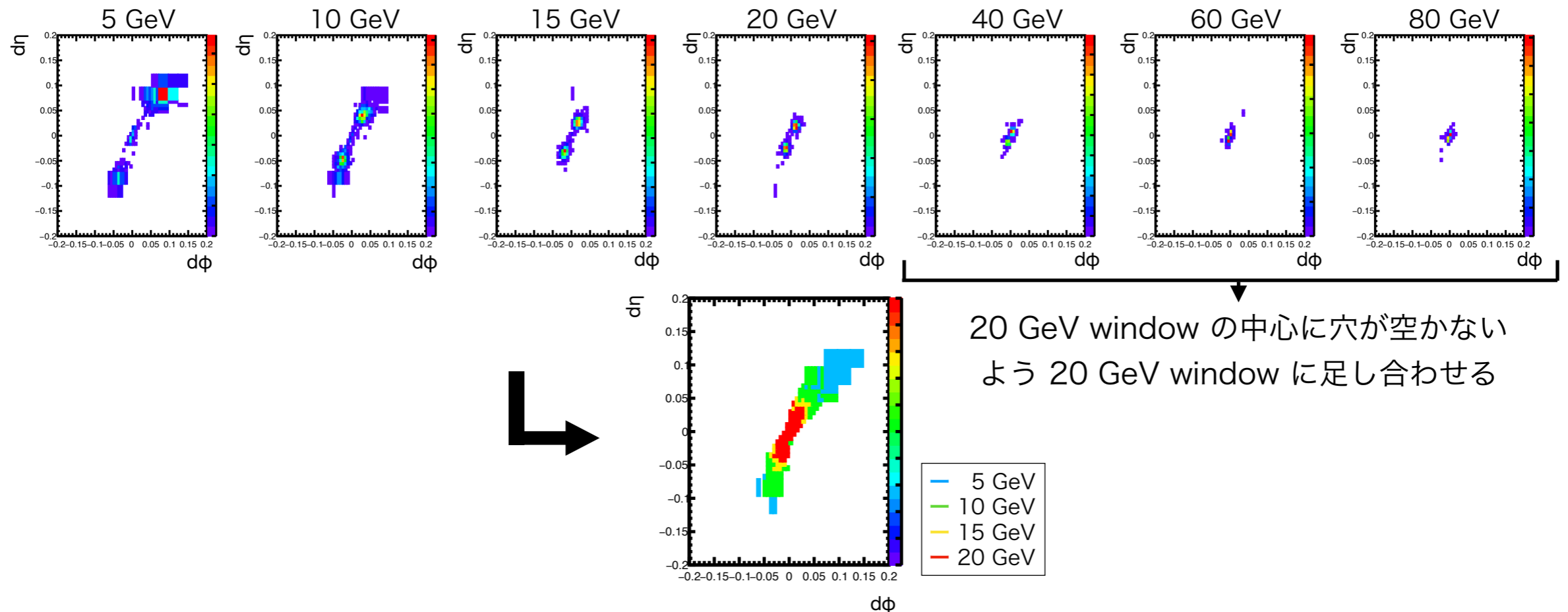
→ η と ϕ の2次元情報から p_T を判定



TGC BW を通ったミューオンについて、各 p_T でRPC BIS78 との位置の差を調べ、 p_T を判定するコインシデンスアルゴリズムを作成した。

Coincidence Window 作成手順 (1)

- ① MC を用いて TGC と RPC BIS78 でのヒット位置, p_T を取り出す
- ② $d\eta = \eta_{TGC} - \eta_{RPC}$, $d\phi = \phi_{TGC} - \phi_{RPC}$ を計算し, p_T 5, 10, 15, 20 GeV の閾値ごとに二次元ヒストグラムにまとめる
 - ・ ビン数は実装するファームウェアのメモリの要請から 32×32 に設定
→ 曲がり方や分解能の必要性を踏まえ, 中心部を細かいビン幅に設定
- ③ 各 p_T の window を重ねて Coincidence Window (CW) とする

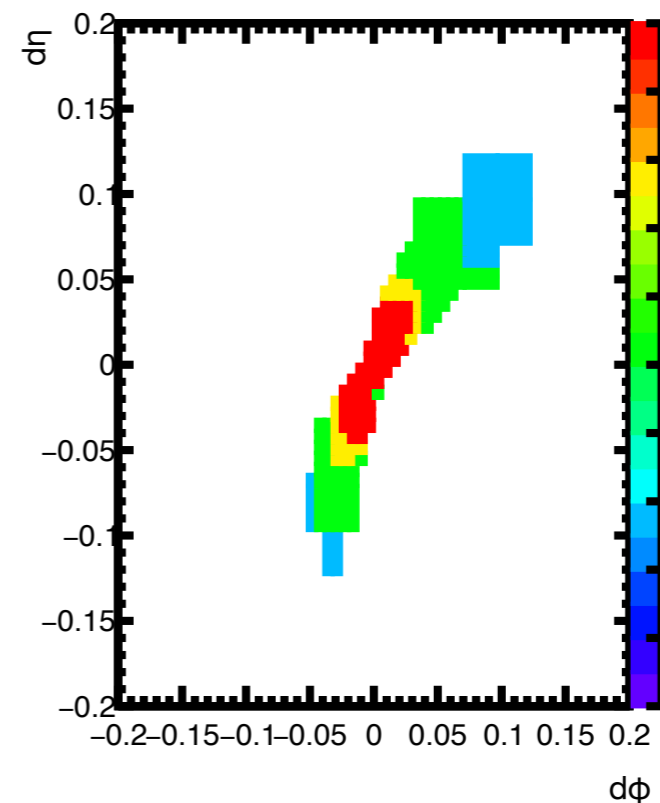
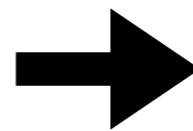
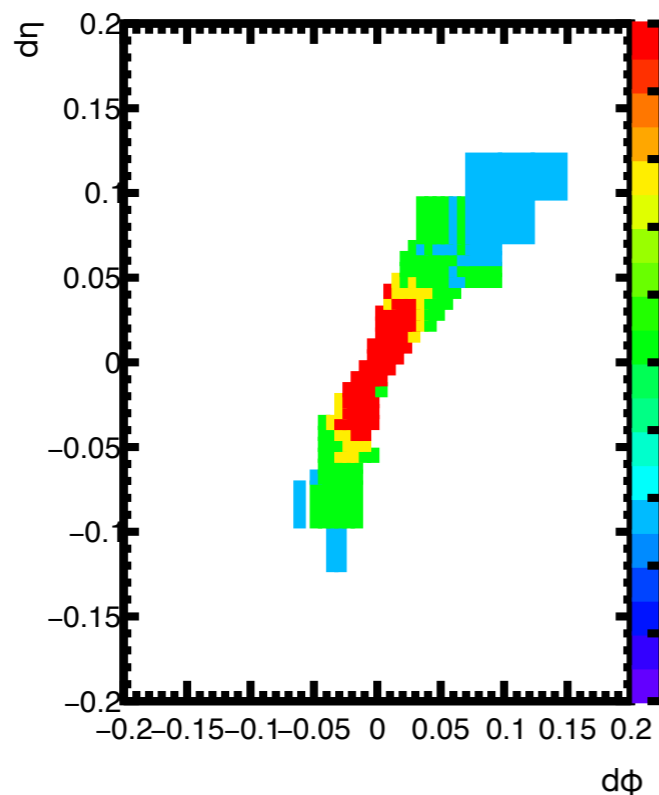


Coincidence Window 作成手順 (2)

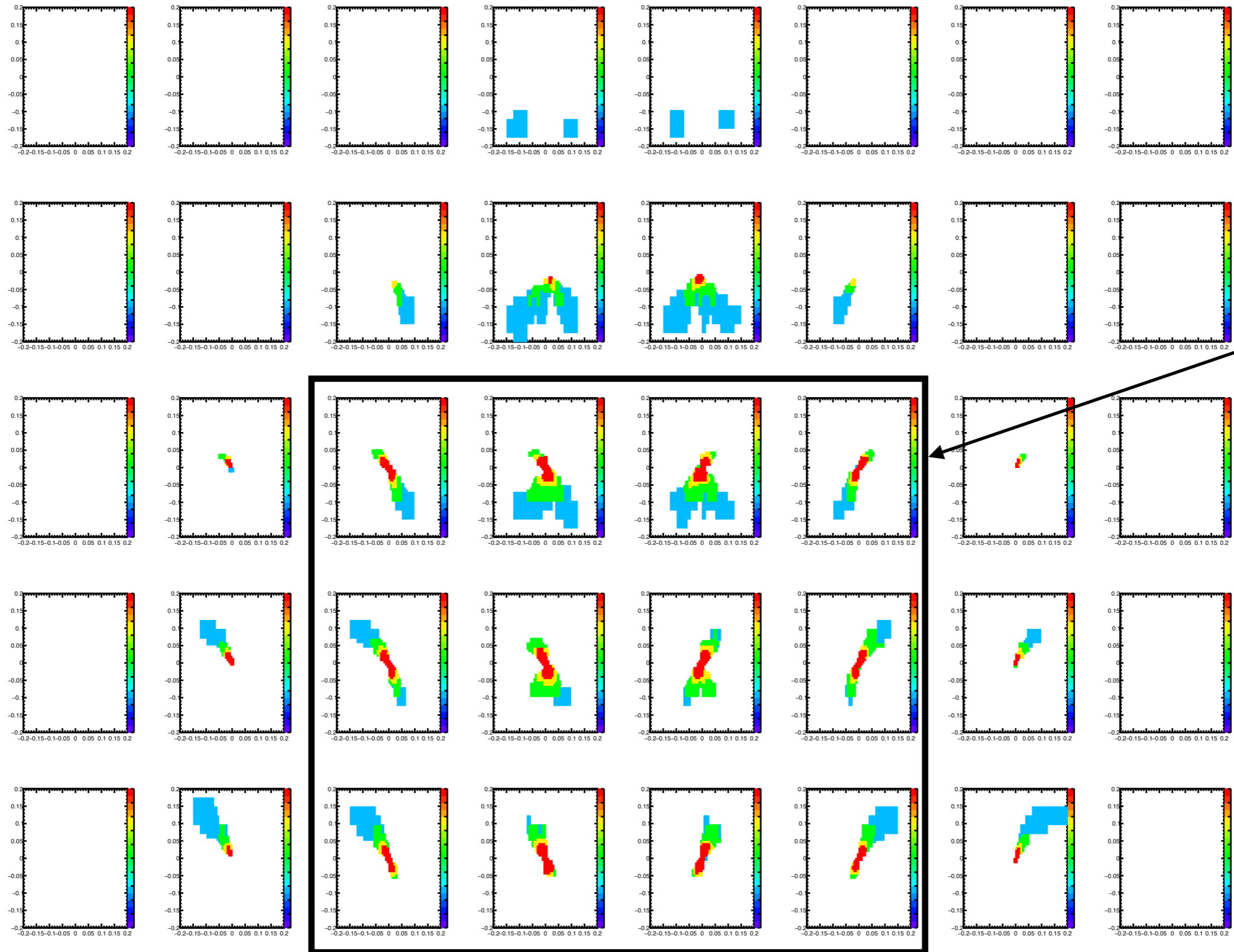
そのままの CW では, 統計量の少なさのため穴が空き, また低い p_T の
ミューオンが多い領域に高い p_T のものが紛れたりしている

→ これらを均す処理を行うことにより整える

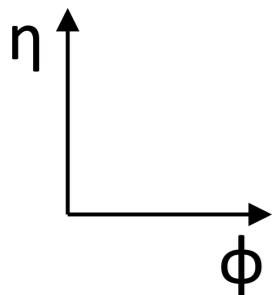
- ・ 高い(低い) p_T ビンに囲まれた低い(高い) p_T のビンを高く(低く)する
- ・ 周りのビンの p_T の平均値よりも大きく低い(高い)ビンの p_T を高く(低く)する



Coincidence Window ($\eta > 0$), 処理後



RPC BIS78
存在領域



Efficiency の評価

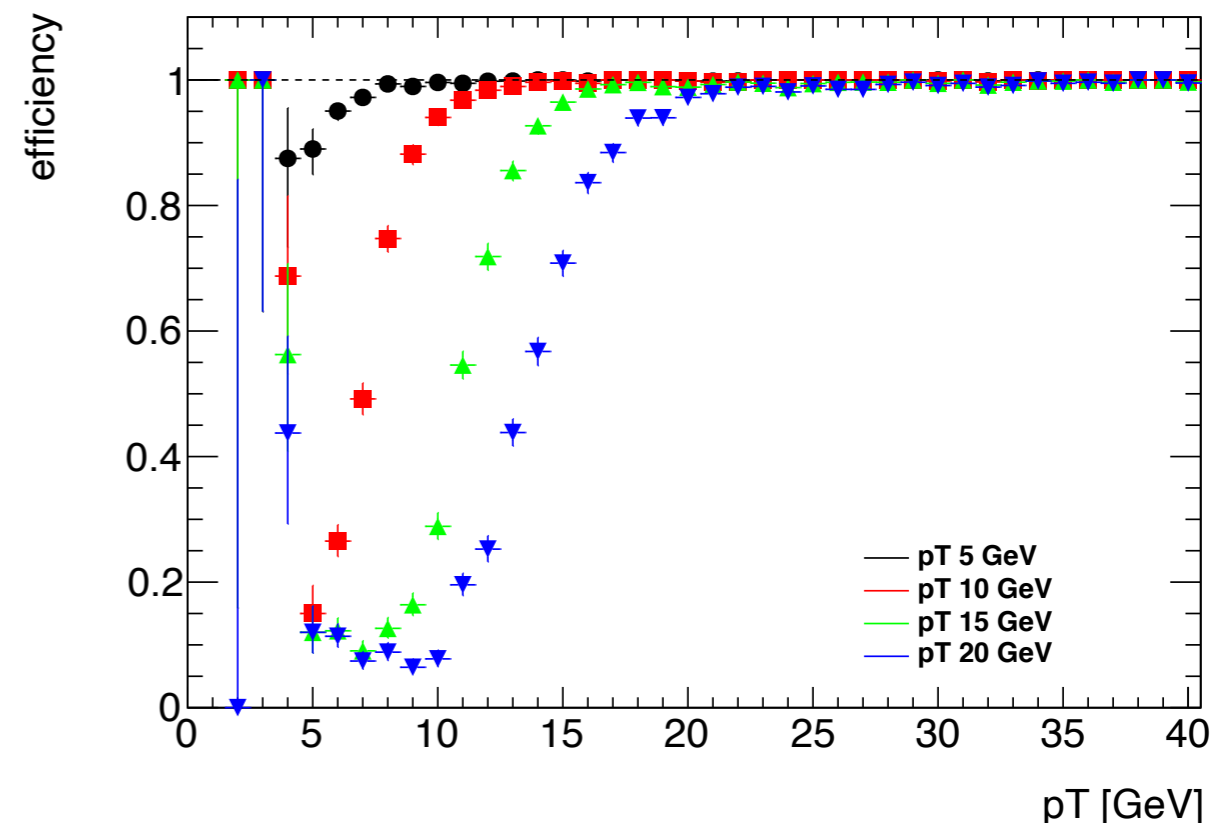
作成した Coincidence Window が各 p_T 閾値に対してどれだけの感度を持つ（トリガーを発行できる）か、同様の MC を用いて評価

$$\text{eff.} = B/A$$

A : RPC を通過し, TGC BW で飛跡が再構成された数

B : Aのうち CW を通過した数

- ▶ 各 p_T 閾値に応じて急激に efficiency が上昇 (turn on curve)
- ▶ p_T の低い領域 ($< 3 \text{ GeV}$) では, TGC BW のトリガー能力が低くイベントが少ない為に評価が難しい

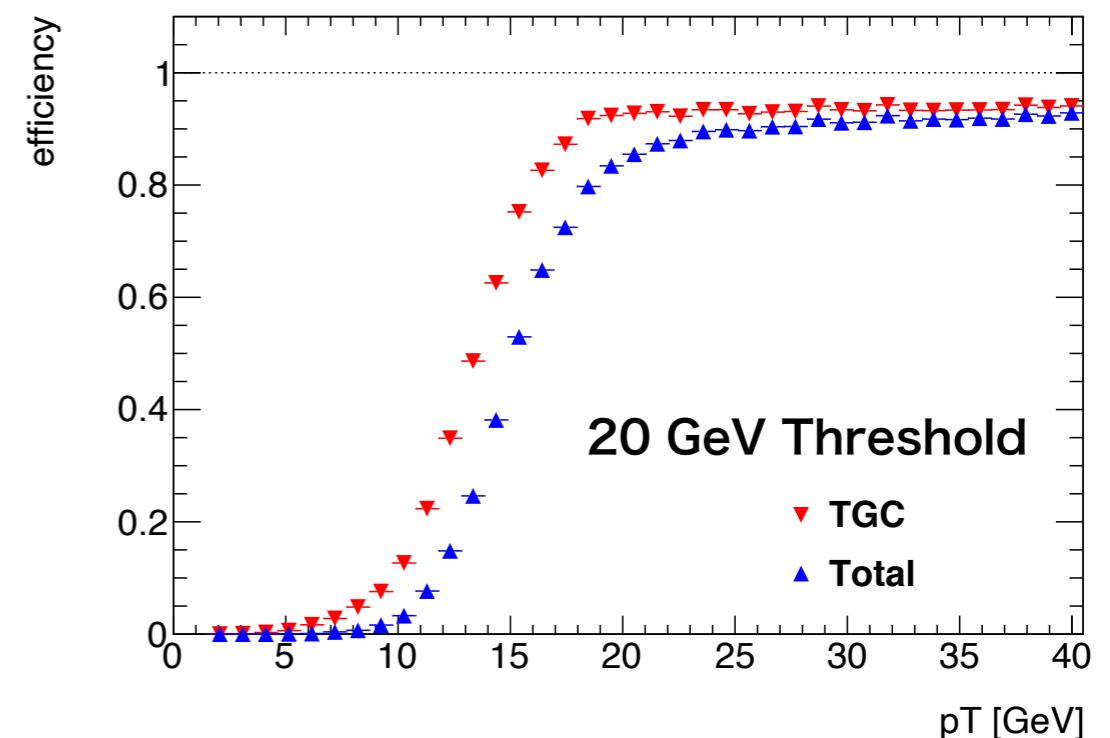


RPC Coincidence の統合

- ▶ RPC BIS78 Coincidence を, 他の Inner Coincidence (EI, NSW, Tile Calorimeter) と統合し, efficiency を確認
- ▶ 20 GeV threshold について,
TGC BW 単体のトリガー発行性能と Inner Coincidence を加えて判定したトリガー発行性能を比較
- ▶ Inner Coincidence で発行する threshold は TGC BW での threshold 以下としている (p_T の低いミューオンの削減に特化)

高 p_T 領域での efficiency の低下を抑えつつ p_T の低いミューオンを削減

	TGC	Total
plateau (%)	93.5	90.9
threshold [GeV]	13.1	15.1
resolution [GeV]	4.12	4.05



まとめ, 今後の展望

- ・ LHC-ATLAS 実験初段ミュオントリガーのため, 磁場内部検出器 RPC BIS78 とのコインシデンスアルゴリズムを開発した.
- ・ 磁場内部のすべての検出器とのコインシデンスアルゴリズムに組み込み, その全体性能を評価した.

今後の展望:

- ・ アルゴリズムや適用領域の更なる改良
- ・ RPC BIS78 の角度情報を用いたコインシデンスアルゴリズムの作成
- ・ トリガーレートの削減率の確認 (現在はまだ不可能)

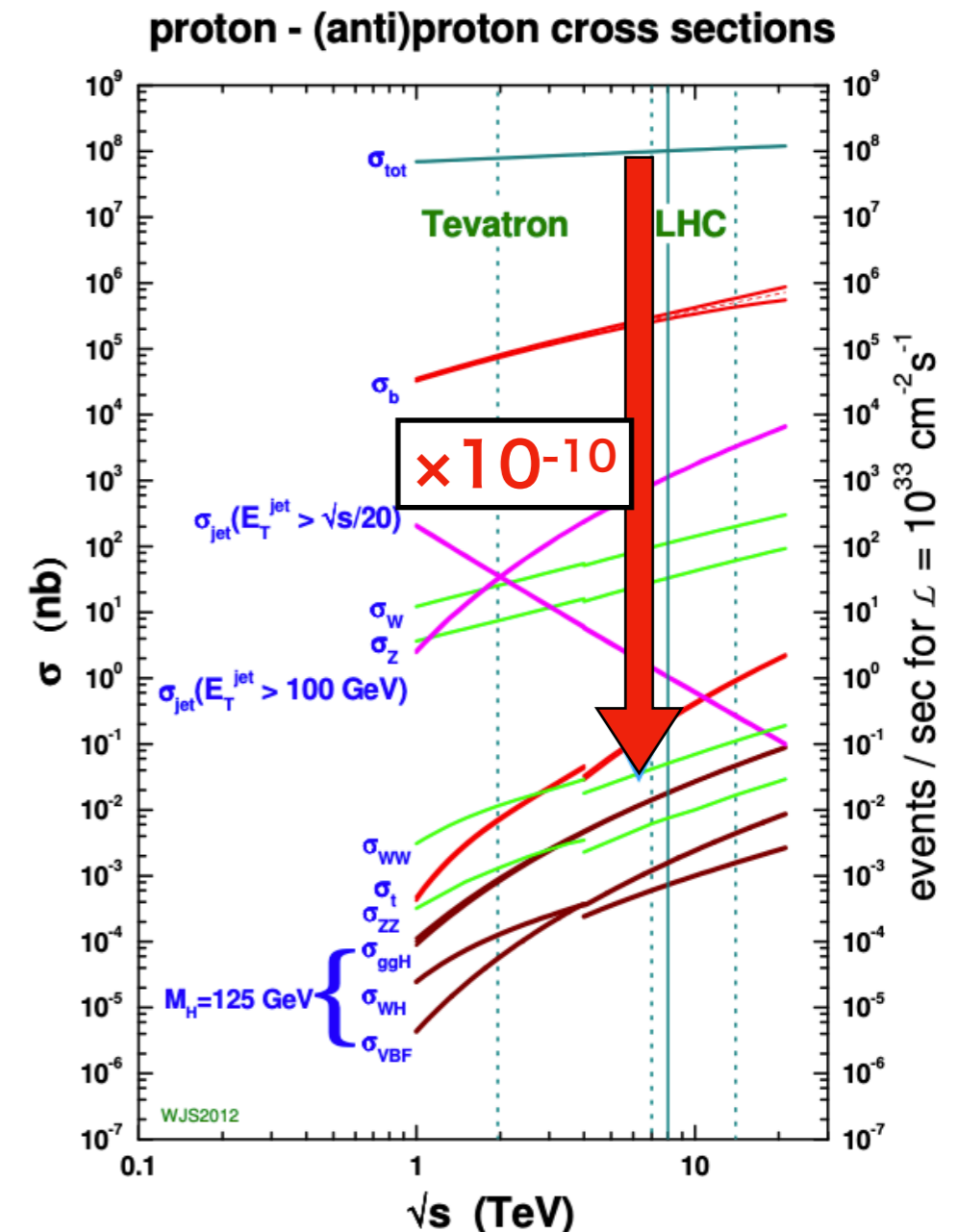
Backup

トリガーの重要性

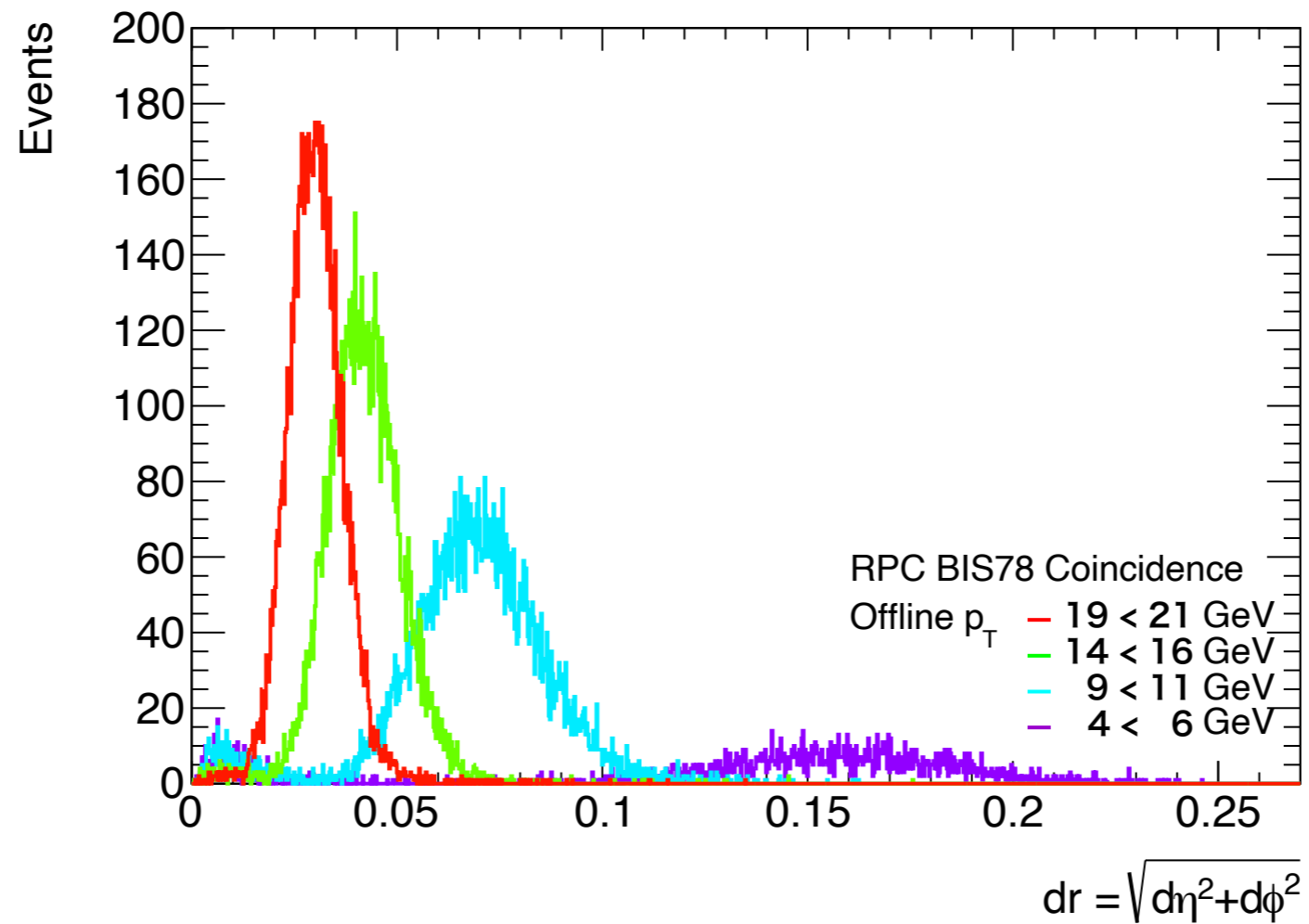
- ・陽子陽子衝突自体が 40 MHz で行われるのに対してデータ記録できるのは 10 kHz 分しかない. (HL - LHC)
- ・一方で, 陽子陽子衝突における非弾性散乱の全断面積に対して, 興味のある物理の断面積は非常に小さい.

→エネルギーや横方向運動量(p_T) に閾値を設け, 興味のある事象のみを正確に選別する (トリガー) ことが重要となる.

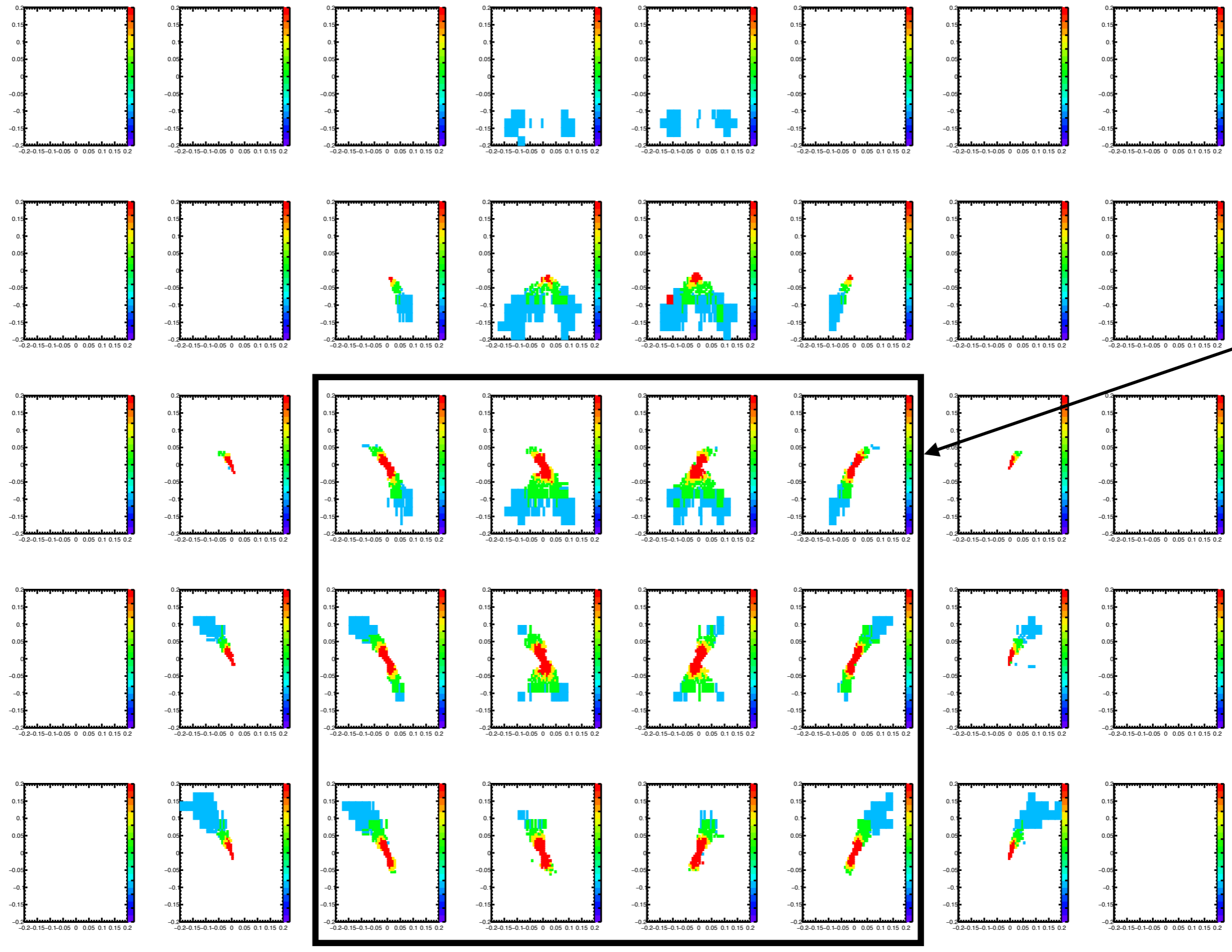
(エンドキャップ部ミュオントリガーとしてのレートは最大で 20 GeV p_T threshold で 10 kHz 程度が目安)



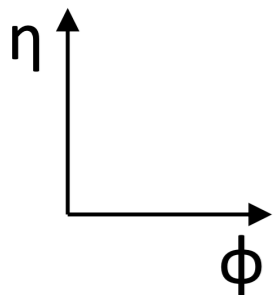
Backup : RPC 領域での p_T ごとの曲がりの大きさ



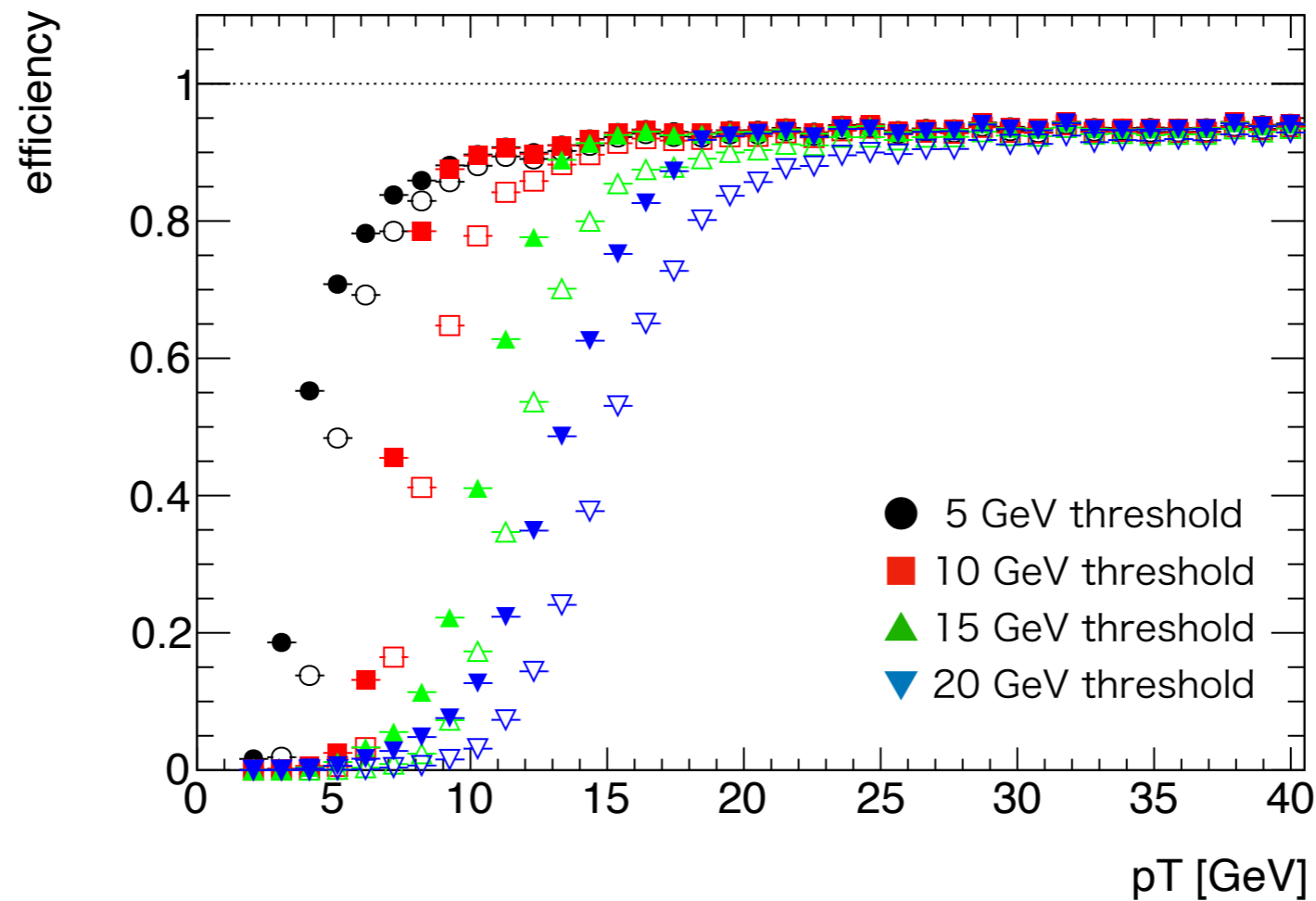
Coincidence Window ($\eta > 0$)



RPC BIS78
存在領域



Backup : TGC 単体及び InnerCoincidence 後の efficiency



塗りつぶし : TGC 単体,

白抜き : Inner Coincidence を含めたもの